

“ハイブリッド・レグ型”石油生産プラットフォームのケーソン沈設実験

大成建設 正会員 田中 剛
同上 池尻 一仁
同上 小林 昭男
同上 正会員 中塚 健司

1. まえがき

最近、原油価格の大幅な低下によって世界的に石油事情が緩和されつつある。我が国では、円高ということも相まってその傾向を強くしている。しかし長期的にみれば我が国のエネルギー資源、特に石油・天然ガス資源の需給が逼迫するであろうことが予測される。このような観点から我が国周辺海域に賦存する石油・天然ガス資源を開発し、有効利用することの重要性はますます高まるものと考えられる。海底石油・天然ガス資源の開発における世界的な技術動向は、その拠点となる海洋石油生産プラットフォームのより大水深域への対応が要求され、従来のジャケット型から水深の増大とともに種々の形式が試みられている現状である。我が国のプラットフォーム建設はジャケット型で水深 180m に達した段階にあるが、今後逐次深部化すると考えられる。

このような背景のもとに、今般（社）日本海洋開発産業協会で新方式のプラットフォーム建設に関する開発調査が行なわれた。当プロジェクトは、水深 250m の海域に技術的に可能なプラットフォームの基本設計を行い、我が国独自の建設技術の確立を目指してスタートした。各種検討の結果 250m 程度の水深に適する構造形式として、ガイドタワー型の利点と、貯油機能を有しかつ掘付、移動が比較的容易である重力型の利点を組み合わせる方式とし、図-1 に示すような形式が選定された。

このプラットフォームの構造は、貯油機能（20,000Kℓ）を有するコンクリート製ケーソンのベースを海底面に設置し、その上にタワーを設置して係留索によってタワーを安定させる形式である。ケーソンとタワーはピン接合で、ケーソン上部の中央の球面受治具上にタワーが設置され、波力、風力等の外力に対して許容範囲内での回転を許す構造となっている。最上部のデッキ上から生産井の掘削が行われる。

このような型式のプラットフォームの基本設計に先だって、施工面まで含めた技術的課題の洗い出しとそれを受けて試設計が行なわれた。試設計の段階において、完成後の安全性およびタワー・ケーソンの建造・曳航には問題は少ないとされ、残された重要な課題の一つとしてケーソンの沈設工事が掲げられた。

この沈設工法の概要は、次のとおりである。①まず、係留された2隻の台船の間に曳航されてきたケーソンを引込み、台船からケーソンを吊り下げる。②ケーソン内に水バラストを徐々に注入して、ある沈設荷重に達したら台船上のウインチ操作によってケーソンを沈めていく。③着底後さらに水バラストを注入することによって傾斜を修正しながらスカートを海底地盤に貫入させる。④海底と地盤との間にグラウト注入して完了である。

波浪・潮流条件下における上記のような沈設工法には以下に述べるような複雑な問題を含んでいる。すなわち近接する複合浮体（当工法ではケーソンおよび2隻の台船の3個）に作用する流体力の相互効果、吊り下げ索によってお互いに連結された浮体の挙動と索鎖張力との相互関係あるいは係留系の非線型性の問題等を含んでおり、ケーソンと台船の挙動・索鎖張力は非常に複雑になる。

本文は、上記の如く解析的に予測が困難な問題点を複合的に内含している当工法の沈設時におけるケーソンおよび台船の挙動を確認し、当工法の安全性を検証するとともに、海象条件の施工限界を明確にするために行った模型実験について述べたものである。なお、実験と併せて現象を線型問題にモデル化し、多浮体の相互作用解析と浮体運動解析を併用して、3浮体連成系の挙動解析を試みた。その解析手法および解析値と実験値との比較についても示した。

2. 水槽実験

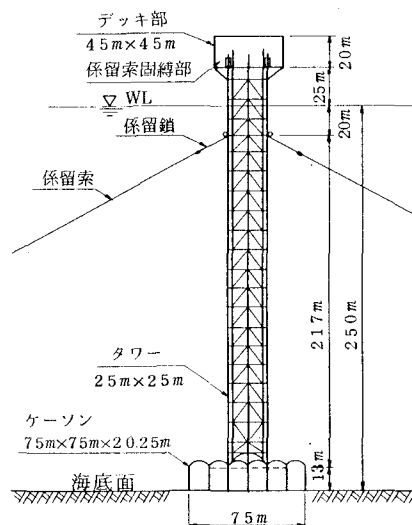


図-1 ハイブリッド・レグ型プラットフォーム

2. 1 実験条件

実験条件の一覧を表-1に示す。以下表について補足説明をする。

(1) ケーソン模型形状： 実機ケーソンは、外周部に曲面の貯油タンクがあり、タンク部の内側はやや低い平面形状になっている。その中央部にはムーンプールの開口部がある。このように実機ケーソンは複雑な形状をしているが、模型ケーソンは単純化して、没水時の総排水量が相似の直方体とした。したがって外郭寸法はやや小さくなっている。

(2) 不規則波の選定： 外海域の波浪の波高と周期の関係は、 DnV の式によると $\sqrt{13H_{1/3}} < T < \sqrt{30H_{1/3}}$ と示されている。文献¹⁾によると日本近海の波浪の周期はもっと長周期側にも分布しているので、実験では沈設時の波浪条件を $H_{1/3} = 1m$ として上式の最大値をとって $T_{1/3} = 0.55^{sec}$ に設定して造波した。表中の不規則波はその実現波である。

(3) 潮流： 実機の計画条件は 0.5ktである。

(4) 波向： 波向と台船の配置との関係で、波向と平行に配置する(Head sea)と直角に配置する(Beam sea)について実験した。

(5) ケーソン沈設荷重： ケーソン吊り荷重(沈設荷重)は、没水時のケーソンの水中重量で吊り下げ索によって支えられる。これは沈設時のケーソンの安定性に影響し水バラスト荷重で調整される。ケーソンの総排水量(69,696^{9f})との比率で示した。

2. 2 模型配置

試設計時の台船とケーソンの配置に準じて、図-2に示す配置で実験した。なお本図に示すようにケーソンを台船の側面から吊り下げる方式(側吊り)の他に、台船中央から吊り下げる方式(中央吊り)についても実験した。

2. 3 使用水槽

平面水槽： 135.5m×B17.0m×H1.6m(水深1.3m)

2. 4 実験手法

上記水槽の中央部付近に図-2の如く模型を配置し、水槽短辺側のプランジャー式造波機による入射波、および潮流発生装置によって潮流を与えた。潮流については水槽内に整流板を設け、模型付近で所定の流速・流向が得られるようにした。

計測項目は、①入射波高(容量式波高計) ②潮流速(電磁流速計) ③係留鎖およびケーソン吊り下げ索の張力(リング・ゲージ) ④ケーソン・台船の動揺量(ジャイロおよび光学式変位計)である。

なお、ケーソンの計測位置は浮上状態から着底直前までを5ステップに分けて、各ステップで吊り下げ索長を固定して行った。

2. 5 実験結果および考察

実験計測の主要項目であるケーソン・台船の動揺および係留鎖・吊り下げ索張力の変動特性に関連するパラメーターとして、①入射波(規則波・不規則波)の波高・周期 ②ケーソンの没水深 ③潮流の有無 ④台船の配置(Head Sea or Beam Sea) ⑤沈設荷重 ⑥ケーソン吊り下げ方式(側吊り、中央吊り)等がある。

表-1 実験条件一覧表

模 型 縮 尺	$\lambda = 1/100$
(相 似 則)	フルード則
ケーソン	66cm×66cm×16cm
台 船	80cm×30cm×6cm
アンカー	鋼製 300g以上
水 深	130cm(水槽最大水深)
波 浪	(規則波) $H = 1, 2, 3, 5cm$ $T = 0.5 \sim 1.5sec$ (不規則波) : 実現波 $(H_{1/3} = 1.47cm)$ $(T_{1/3} = 0.58sec)$ $(H_{1/3} = 2.28cm)$ $(T_{1/3} = 0.57sec)$
潮 流	$U = 2.6cm/s$
波 向(流向)	Head Sea & Beam Sea
台船係留方式	4点独立係留
係留鎖初期張力	$T_i = (115g, 135g)$
ケーソン吊り荷重	排水量の1.5%, 3.0%, 4.5%
ケーソン吊り方式	側吊り&中央吊り

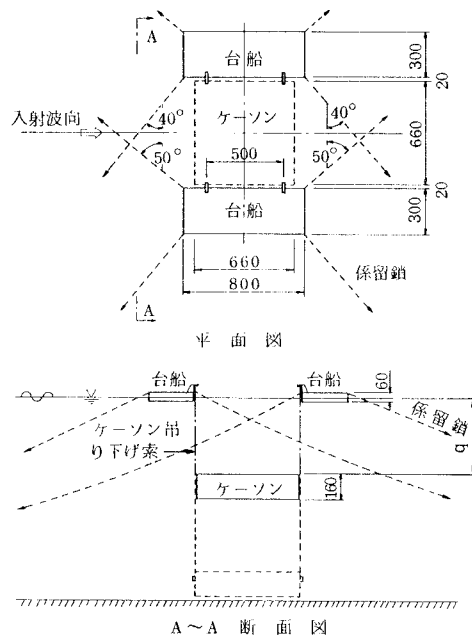


図-2 実験模型配置図 (Head Sea) (側吊り)

潮流の有無による差異はほとんどみられなかったこと、また Beam Sea では台船の動揺が大きく工法として不適と思われることより、Head Sea 配置で潮流なしの波浪条件下における結果について述べることにする。

(1) 浮体動揺および索鎖張力の変動特性

実験は、ケーソンの沈水深 $q = (\text{浮}), 0, 20\text{cm}, 50\text{cm}, 112\text{cm}$ の 5 ステップで行った。

$q = (\text{浮})$ では、ケーソンは浮いている状態で、ケーソンおよび台船の動揺は $T = 1.0^{\text{sec}}$ でピークを示す。これは、この段階では吊り索が短かいのでそのバネが固く、ケーソン・台船の連成系にケーソンの固有周期 $T_0 = 0.96^{\text{sec}}$ が支配的になるためであると考えられる。索鎖の張力の変動は比較的小さい。

$q = 0\text{cm}$ のときも、ほぼ同様の現象がみられた。

$q = 20\text{cm}$ のときの計測結果の例を図-3 に示す。 $q = 20\text{cm}$ になるとケーソンは完全没水の状態で、付加質量が大きくなり台船の動揺を規制するようになるため、台船・ケーソンともにその動揺は小さくなるが、ケーソン吊り下げ索の張力の変動は $T = 0.9^{\text{sec}}$ 以上で急勾配で大きくなる。勾配急変部は台船の固有周期 $T_0 = 0.8^{\text{sec}}$ とほぼ一致し、台船の動揺が吊り下げ索によって規制されていることを示している。吊り下げ索張力の変動が大きくなると、図-3 のケースでは $T \geq 1.1\text{sec}$ でスナップ荷重が発生するようになる。(スナップ荷重については後述) 没水状態のケーソンの復元力は非常に小さいので吊り下げ索からの荷重によって動揺をおこしやすい。図をみると吊り下げ索張力の変動とケーソンのピッチの傾向が一致しているのがわかる。 $T \geq 1.1^{\text{sec}}$ でスナップ荷重が発生するようになると、ケーソンは吊り下げ索の張力が 0 のとき一時的に水中自由浮体となって大きく動揺しようとするが、次の瞬間に張力(スナップ荷重)が発生すると台船はこの張力によってケーソンの動揺に引きこまれることとなる。この様子がケーソンと台船のピッチの図からうかがえて、台船の動揺はスナップ荷重発生後ケーソンの動揺に沿って急増している。

$q = 50\text{cm}$ 以深では、ケーソンに作用する波浪の影響は小さくなり、また吊り下げ索のバネ係数も小さくなる。したがって台船とケーソンの動揺の位相ズレを索の伸縮で吸収できるようになるため、全周期域にわたってケーソン、台船の動揺および索鎖張力の変動ともに小さくなり安定した連成系となる。

以上、規則波による動揺特性について述べた。つぎに、不規則波による動揺特性をまとめると下記のとおりである。①有義波高 $H_{1/3} = 2.28\text{cm}$ でも、係留系の動揺量は、入射波高 $H = 1.0\text{cm}$ の規則波の動揺量と同程度か、あるいは小さい。またスナップ荷重も発生しない。②台船およびケーソンのサージは動揺周期が長くなり、特にケーソンでは 10.0^{sec} 以上となる。この現象は長周期変動漂流力の影響であると思われる。

(2) 吊り下げ索のスナップ荷重

スナップ荷重とは、台船とケーソンの動揺の位相ズレからケーソン吊り下げ索の張力が 0 (いわゆる“遊び”の状態)で索がゆるむ)となり、再び張力が作用するときに発生する衝撃をともなう荷重である。スナップ荷重が発生した条件下での吊り下げ索張力の変動状況の例を図-4 に示す。図からわかるように、スナップ荷重は衝撃的な荷重であるため、そのピーク値は非常に大きな張力となり、索が破断に到る可能性がある。また台船・ケーソンの動揺はギクシャクした不規則な挙動を示すようになる。このようにスナップ荷重は非常に危

実験条件

波 向 ;	Head sea
比設荷重 ;	3.0 %
没水深 ;	$q = 20\text{ cm}$
流 れ ;	$v = 0\text{ cm/s}$
波 高 ;	$H = 1.0\text{ cm}$

模型配置図 (中央吊り)

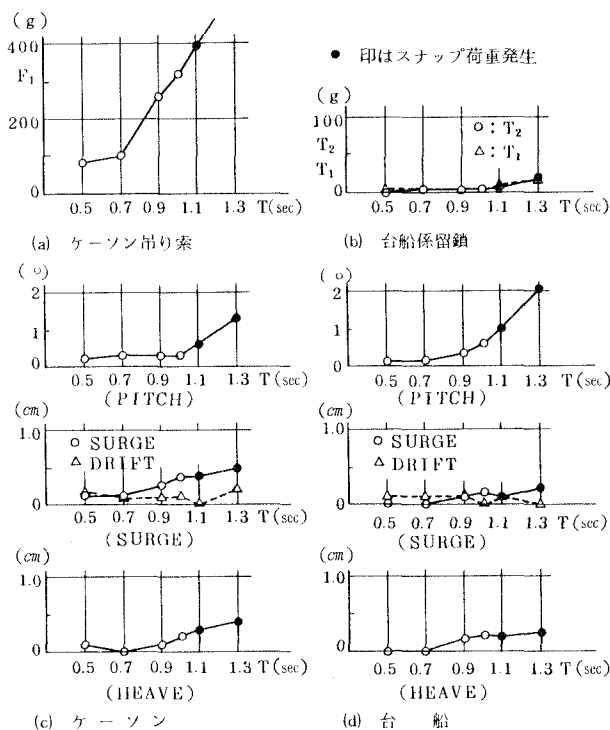
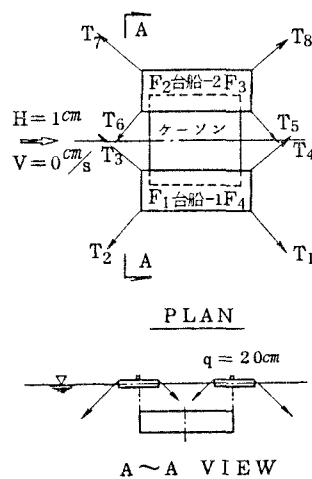


図-3 実験結果の例

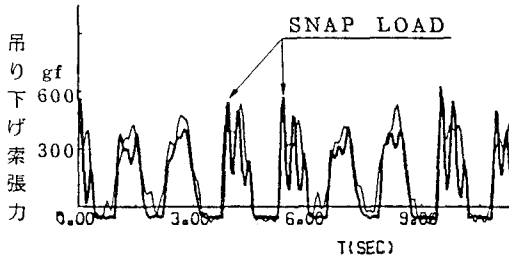


図-4 スナップ荷重発生例
(張力の絶対値は0点補正を要す。)

険な現象であるため、たとえ微小であっても発生してはならない現象である。

表-2にスナップ荷重の発生と入射波周期との関係を示す。表中、 $q=20\text{cm}$ 時における沈設荷重の増加とスナップ荷重発生周期との関係から、沈設荷重を増加することによって吊り下げ索の初期張力が増加され、スナップ荷重の発生を長周期側に移動できることがわかる。

$q=(\text{浮})$ のとき $T=0.9$ と 1.0sec では、共振によって3浮体の動揺が非常に大きくなるために、この部分のみでスナップ荷重が発生する。

$q=0\text{cm}$ で発生しないのは、ケーソン上部を乗上げる波の水塊によって吊り下げ索の平均張力を増大させ、プレテンションを付加した状態となるためである。

$q=50\text{cm}$ 以深では、索長が長くなりそのバネ係数が小さくなるためスナップ荷重は発生しない。

以上から、当工法においてもっとも危険な状態はケーソンの没水深 30cm 程度以浅の部分であると判断される。

(3) 側吊り・中央吊りの比較

スナップ荷重の発生状況から両者を比較すると、中央吊りの方が短い周期でスナップ荷重が発生する。これは中央吊りの場合、索系のバネとして台船のヒープの復元力が支配的となり、側吊りの場合に支配的なピッチングの復元力に比しバネ係数が大きいためである。ただしスナップ荷重の発生しない範囲では両者に顕著な差異はみられない。

3. 数値解析

3.1 解析手法

沈設時のケーソンおよび台船を図-5に示すようにモデル化する。実際の現象には、種々の非線型要因が含まれるが、線型解析するために以下の仮定を設けた。

- ① 各浮体周辺の海水を非粘性、非圧縮、非回転の理想流体とし、入射波は、微小振幅波とする。
- ② 浮体は剛体運動を行なうとし、また、係留鎖および吊り索による浮体の非線型の復元力をこれと等価な線型復元力とする。
- ③ 現象はすべて周期的とし、周波数領域で解析する。

以上の仮定により、図-5に示した解析モデルは、各6自由度を有する3質点系となり、その動的挙動は、

(1) 式で示す線型連立方程式を解くことにより解明される。

$$\{M_o + M_a\} \{\ddot{X}\} + \{C\} \{\dot{X}\} + \{K_o + K_m + K_b\} \{X\} = \{F\} \cdots \cdots (1)$$

M_o, M_a : 浮体の質量および付加質量

C : 造波ダンピング係数

K_o, K_m, K_b : 流体、係留鎖、吊り索による復元力係数

F : 波浪強制力

$\ddot{X}, \dot{X}, X$: 浮体の応答

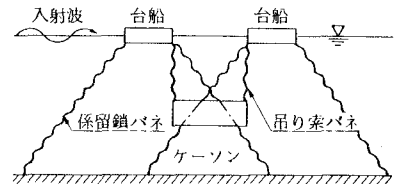


図-5 ケーソン沈設解析モデル

表-2 ケーソン吊り索のスナップ荷重発生状況
(条件) 規則波: 波高 $H=1\text{cm}$
流れ: なし

q	Ws	TYPE	波の周期(sec)					
			.5	.7	.9	1.1	1.3	1.5
(浮)	(1.5%)	A	○	○	●	●	○	
0cm	1.5%	A	○	○	○	○	○	○
20cm	"	A	○	○	○	●	●	
"	3.0%	A	○	○	○	○	○	○
"	"	B	○	○	○	○	○	○
"	4.5%	B	○	○	○	○	○	○
112cm	1.5%	A		○	○	○	○	○

q : ケーソン没水深

Ws : 沈設荷重

TYPE : A, 側吊り B, 中央吊り

●はスナップ荷重発生を示す。

(1) 流体力および波浪強制力の解析

上述の仮定に基づき、浮体周辺の流体領域には、ポテンシャル理論の適用が可能となり、流体の連続方程式、自由表面、構造物表面および無限遠方での流体の挙動を規定する境界条件から成る境界値問題を解くことにより各浮体の付加質量、造波ダンピング係数、波浪強制力等の流体力が求められる。この解析モデルを図-6に示す。このような多浮体間の相互影響を含む流体力の数値解析法として今回解析には、文献³⁾の手法による三次元特異点分布法を用いた。複数浮体の相互影響に関する詳細については文献³⁾を参照されたい。

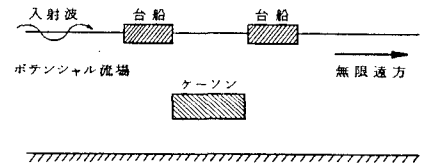


図-6 流体力の解析モデル

(2) 係留鎖および吊り索による復元力の解析

係留鎖および吊り索による各浮体の復元力は、索鎖張力と浮体の変位との関係で与えられるが、非線型な特性を有している。しかし、実際には、索鎖に対し充分安全で、かつ運動変位に対し索鎖がゆるむことのないような初期張力が与えられているため、沈設工程での静穏な海象条件下では、索鎖がゆるんだり、変位が非線型領域まで至ることはなく、索鎖による復元力を線型モデル化することは妥当であると考えられる。そこで本解析は、張力・変位曲線を浮体の動揺範囲内で等価線型化を行ない、係留鎖、吊り索による台船およびケーソンの復元力を求めた。

3. 2 実験結果と解析結果の比較

解析結果と実験結果の比較を図-7に示す。なお本図の計算条件は図-3と同一である。

図から、全般的に解析値と実験値はよく一致していると言える。ただし、サージの長周期、ピッチのピーク付近で実験値と解析値の差異が見られるのは、以下の非線型性によると考えられる。

① 解析値は、動揺がピークを示す波の周期（特にピッチ）で、過大な応答を与えている。これは、式(1)の運動方程式で速度に比例する、いわゆる粘性減衰力を明確に含んでないためと考えられる。

② 解析では、索鎖の復元力は等価線型化を行なっているが、実験では、浮体の定常的な傾き、またサージ方向のドリフトによる係留鎖のゆるみ等があり、等価線型化の範囲を越え、非線型効果が卓越するケースもありうる。

③ 実験では、波の周期が長くなると吊り索にスナップ荷重の発生が観察された。スナップ荷重は衝撃的な荷重であるため、そのピーク値は非常に大きな張力となり、索鎖の等価線型化の範囲を越えると共に、各浮体の動揺は不規則な挙動を示し、解析では考慮できなくなる。

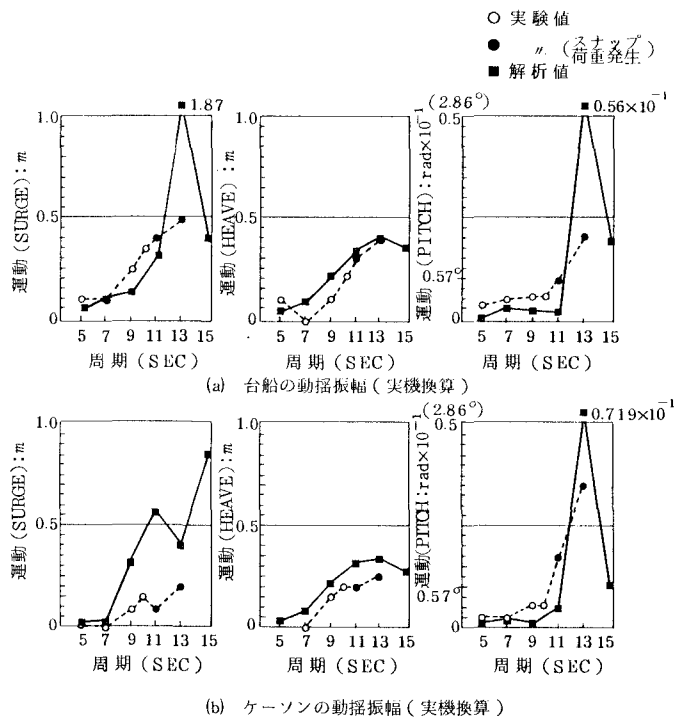


図-7 解析結果と実験結果との比較

4. 実機基本設計への展開

前述の実験結果は、実海域での工事に対応させて施工条件を明確にする必要がある。ここでは実機工事において重要と思われる下記項目について考察を行う。

(1) 波浪条件

波浪の限界条件は、索鎖の張力および台船上での安全な作業限界となる動揺量から決められると思われる。台船動揺の限界角度は、デッキ上に波が越波してこないという条件から 2° 程度と考えられる。実験では、入射波高 1 cm に対するピッチの振幅は 0.5° 程度と小さいが、 2 cm になると 2° 以上となる。不規則波では $H_{1/3} = 2.28\text{ cm}$ でも台船の動揺量は小さい。ただし、この例はHead Seaの場合の値である。実海域の波は方向スペクトル

にある幅をもっていることを考慮すると、Beam Sea方向からの波に対しては不規則波でも大きく動揺するので実機の限界波高は、Head Seaの実験波高より小さくおさえておく必要がある。一方、文献²⁾の日本近海域での海象条件の調査結果によると、 $H_{1/3} = 1\text{ m}$ の年間非超過確率は30%程度という推算値がある。これから波浪限界条件として $H_{1/3} = 1\text{ m}$ とした場合、時期を選べば沈設工事に大きな制約を受けないと思われる。

以上により、波浪限界条件としては、波の方向スペクトルの集中度にもよるが、 $H_{1/3} = 1.0\text{ m}$ 程度におさえておく必要がある。また、安全のため海上作業期間をできるだけ短縮できるような工法を採用すべきである。

(2) ケーソンの沈設荷重

沈設荷重を3%にすると $T \geq 1.1\text{ sec}$ でスナッフ荷重が発生する。文献¹⁾によると、日本近海域の波高1 m以下で、 $T > 7.0^{\text{sec}}$ の波の出現頻度は非常に少ない。これと上記を比較すると約1.5倍かけはなれているため沈設荷重を3%程度にすれば実機工事においてスナッフ荷重の発生は、防止できると考えられる。

以上を受けて基本設計では、図-8に示すような工法が採用された。この工法は、海上での作業期間を短縮するとともに、もっとも危険なケーソン没水深が浅い時を短期間におさえるために試設計時の沈設工法を若干修正したものである。施工手順は、あらかじめケーソン上に台船を搭載し、曳航・位置決めの後、台船からアンカリングする。この状態で波浪条件の平穏時を選んで、バラスト水によってケーソンを沈設する。ケーソンの吊り下げ方式は、中央吊り方式である。

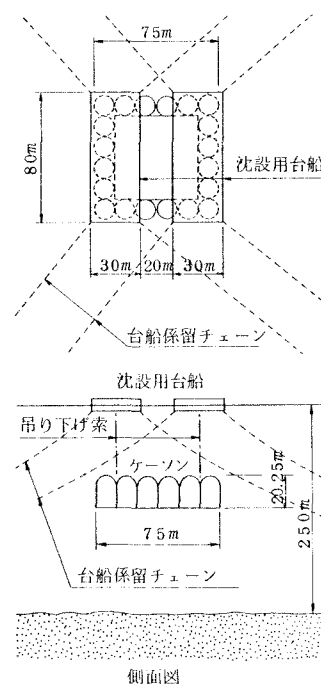


図-8 基本設計の沈設工法

5. まとめ

実験によって試設計時に検討された沈設工法は、下記の条件で施工すれば実海域においても安全な施工が可能であることが確認された。

①台船をHead Seaの配置とする。 ②ケーソンの沈設荷重を総排水量の3%程度とする。

③限界海象条件として有義波高1 m程度以下の波浪条件のときを選んで沈設工事を行う。

最終的な実機の基本設計では、上記を反映させて試設計時の沈設工法に修正が加えられた。

また、実験と併せて行った線型化解析の結果は、実験値を比較的良好にシミュレートしており類似の沈設工事に対して今後有効に活用できるとと思われる。

6. あとがき

本実験は、通商産業省の委託により(社)日本海洋開発産業協会(JOIA)が昭和56年度から60年にわたって実施した「海洋石油生産プラットフォーム開発調査」の一環として行ったものである。

当プロジェクトでは、事例調査から、実海域1/10模型実験および本文に示したケーソン沈設水槽実験を含めて、多分野におよぶ検討が行われ、その結果にもとづいて従来にない新型式の“ハイブリッド・レグ型”石油生産プラットフォームの基本設計がなされた。我が国独自の技術による海洋プラットフォームとして、近い将来の実現が期待される。

参考文献

- 1) Y. Yamanouchi et al. "On the Winds and Waves on the Northern North Pacific Ocean and South Adjacent Seas of Japan as the Environmental Condition for the Ship", Papers of Ship Research Institute No. 5, Tokyo, Japan, Mar. 1965
- 2) 日本造船研究協会, 「北太平洋の波と風の統計図表」, 1980年 3月.
- 3) G. Van Oortmerssen, "Hydrodynamic Interaction Between Two Structures Floating in Waves", 2nd International Conference on Behavior of Off-shore Structures, Paper 26, August 1979.